

文章编号: 1007-2780(2013)04-0626-07

基于 SURF 的抗视角变换图像匹配算法

苏可心^{1,2}, 韩广良^{1*}, 孙海江

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: skx_1989@126.com;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对原 SURF 算法难以解决图像发生仿射变换特别是发生大视角变换时的有效匹配问题, 提出了一种基于 SURF 的抗视角变换图像匹配算法。算法首先通过模拟可能的视角变换对基准图像进行视角补偿来生成模拟图像序列; 再对序列中的每幅图像分别提取 SURF 特征点并映射到基准图中, 构成基准图像的特征点集, 从而增加了基准图像中抗视角变换特征点数目; 最后以欧氏距离作为相似度度量准则得到待配准图像和基准图像间的 SURF 匹配特征点对。实验结果表明, 所提算法增加了特征点匹配对数目, 改善了视角变换过大(大于 60°)使得图像无法匹配的情况。

关 键 词: SURF; 视角变换; 模拟图像序列; 图像匹配

中图分类号: TP752; TN911.73

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132804.0626

Anti-Viewpoint Changing Image Matching Algorithm Based on SURF

SU Ke-xin^{1,2}, HAN Guang-liang^{1*}, SUN Hai-jiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China, E-mail: skx_1989@126.com;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To overcome the affine transformation, especially great viewpoint changing between the real-time image and the reference image, an anti-viewpoint changing image matching algorithm based on SURF is proposed to bridge the gap of the original one, which may lead to failed matching for the lack of correct matched pairs. The proposed algorithm simulated possible perspective transformations from the original image, generated a set of simulated image sequences, and extracted SURF feature points in the sequence images. Then, the feature points of the simulated image sequence were mapped to the reference image. Finally, the matching point pairs are obtained by the method of the euclidean distance criterion. Experiment results show that the proposed algorithm increases the matching pairs of the feature points, and overcomes the influence of viewpoint change (more than 60°) in image matching.

Key words: SURF; viewpoint-changing; simulating image sequence; image matching

1 引 言

随着图像匹配技术在三维重建、图像搜索、模

式识别等计算机视觉领域的广泛应用, 基于局部特征的图像匹配技术成为国内外的研究热点^[1]。近年来, 涌现了诸多基于局部特征的图像匹配方

收稿日期: 2013-01-04; 修订日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61172111)

作者简介: 苏可心(1989—), 女, 吉林磐石人, 硕士研究生, 研究方向为数字图像处理、图像配准。

* 通信联系人, E-mail: hangl@ciomp.ac.cn

法,如:Harris角点检测、Harris-Laplace、Hessian-Laplace^[2]、DoG、Harris-Affine、Hessian-Affine^[3]、MSER^[4]等。直到2004年,David Lowe^[5]提出的SIFT算法因其对旋转、尺度变换、光照变化等都具有良好的鲁棒性而得到广泛研究。其中,2006年,Bay^[6]等人提出的SURF(speeded-up robust features)算法,采用箱式滤波器近似SIFT算法中的高斯滤波过程,并引入积分图像来加速卷积计算,从而实现了在各方面均接近或超越SIFT性能的同时,计算速度较SIFT算法提高了近3倍。

尽管SURF算法具有广泛的工程应用,但对于图像搜索和物体识别中经常出现的视角变换过大导致匹配失败的问题还是无能为力。针对此问题,本文提出了一种基于SURF的抗视角变换图像匹配算法,实验结果表明,所提算法不仅继承了原SURF在尺度、光照、旋转、噪声、缩放等方面的鲁棒性,而且能够适应大于60°的视角变换情况,再明显增加了匹配点对数的同时提高了匹配准确率,具备一定的工程实用价值。

2 SURF 算法原理

SURF特征点提取与描述过程一般包括如下4个步骤^[7-9]:

(1)特征点检测。选取不同的箱式滤波器建立图像尺度空间;采用Hessian矩阵检测极值点,并精确特征点的位置和尺度。

(2)特征点方向分配,通过统计特征点邻域的Haar小波响应值确定特征点方向。

(3)建立特征点的描述符,为每个特征点沿主方向建立64维的特征描述向量。

(4)SURF特征匹配。采用最小欧氏距离准则来完成特征向量集的匹配,并引入RANSAC^[10]算法对匹配点对进行筛选,从而提高变换模型参数估计的准确性。

3 SURF 算法改进

原SURF算法的特征点邻域梯度分布直接影响特征点方向的分配以及描述符的生成。而大视角差异情形,会导致图像发生不规则的几何形变,同时特征点邻域梯度分布也会随之发生畸变,使得SURF算法性能明显下降。针对此问题,本文做出如下改进:(1)对于基准图像模拟视角变换

生成一组图像序列;(2)对序列中的每幅图像用SURF算法进行特征点提取;(3)将提取的特征点映射到基准图像中,使基准图像的特征点数目明显增多;(4)利用欧氏距离作为相似度量准则,完成匹配。本文算法框图如图1所示。

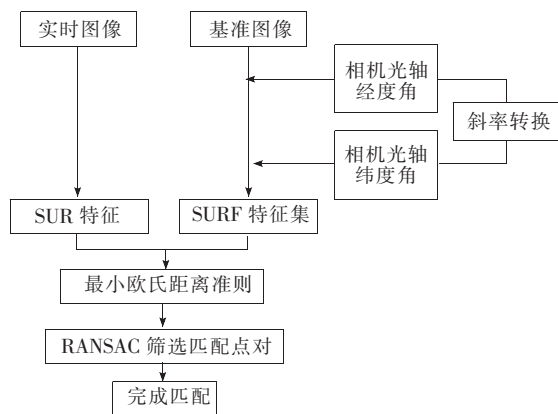


图1 本文算法框图

Fig. 1 Diagram of proposed algorithm

3.1 仿射变换的空间模型

在物体边界分段光滑的条件下,可通过改变仿射平面来模拟视角的改变^[11-13]。仿射变换过程如图2所示。

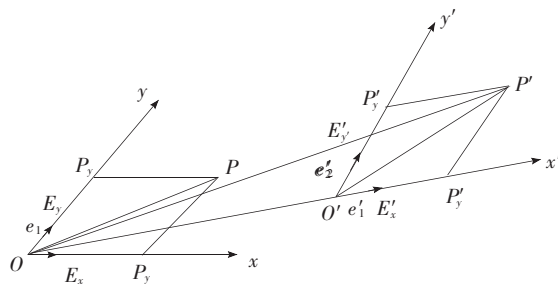


图2 仿射变换过程

Fig. 2 Affine transformation

利用向量的加法和向量的坐标表达,有:

$$\begin{aligned} \vec{op}' &= \vec{oo'} + \vec{o'p'} = (a_{13}e_1 + a_{23}e_2) + \\ & x(a_{11}e_1 + a_{21}e_2) + y(a_{12}e_1 + a_{22}e_2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\vec{op}' = x'e_1 + y'e_2 \quad (2)$$

由式(1)、式(2)得:

$$\begin{cases} x' = a_{11}x + a_{12}y + a_{13} \\ y' = a_{21}x + a_{22}y + a_{23} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $a_{11}, a_{23}, x, y, a_{13}, a_{21}$ 为任意正整数。由 $\vec{op}, \vec{op}'$ 互不平行,因此,在相机转动过程中的形变模型为式(4):

$$u(x, y) = u(ax + by + e, cx + dy + f) \quad (4)$$

其中 $A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 是任意的满足行列式为正的平面图,如图 3 所示, A 平面可分解为:

$$A = \lambda \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

记作: $A = \lambda R(\psi) T_t R(\varphi)$, 式中, $\lambda > 0$, λt 是 A 的行列式; $\varphi \in [0^\circ, 180^\circ]$; $R(\psi)$ 表征图像旋转角度 ψ , T_t ($t \geq 1$) 称作相机的倾斜角。 φ 和 $\theta = \arccos(1/t)$ 表示相机的观测角度, ψ 是相机绕其光轴进行旋转所产生的旋转角度, 这些参数的物理意义如图 3 所示。

在这个仿射模型中, 相机在距离平面物体很远的位置。初始时相机位于物体的正前方, 接着相机在平行于物体的平面上运动, 同时物体也在原平面上运动。不妨将被测物法平面与相机光轴映射平面间产生角度 φ 定义为经度角; 将被测物平面 u 的法线与光轴之间产生角度 θ 定义为纬度角, 倾斜度 $t = 1/\cos\theta$ 。相机绕着其光轴旋转。相机的前后移动将会改变参数 λ 的值。当 $\lambda_0 = 1$, $t_0 = 1$, $\phi_0 = \psi_0 = 0$ 时, 相机在图像的正上方, 随着参数 $\lambda, t, \varphi, \psi$ 的改变相机发生不同程度的旋转。

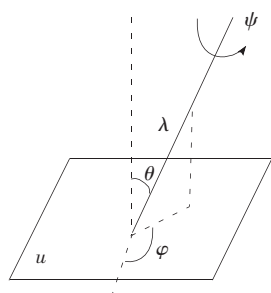


图 3 仿射变换分解图

Fig. 3 Exploded image of affine transformation

3.2 斜率转换

通过以上分析, 不同视角下拍摄的图像都和原图像有坐标转换关系, 因此, 可通过原图像找到不同视角下图像之间的坐标变换关系。我们将相机视角从正视到斜视所形成的形变称为绝对斜率。而实际图像匹配往往发生在具有不同斜视角度的两幅图像间, 在此我们将这两者之间的斜率变换称为相对斜率, 两者间的旋转角变换为相对旋转角。图 4 为不同视角下的成像过程示意图。将它们分别表示为 $u_1(x, y) = u(A(x, y))$ 和

$u_2(x, y) = u(B(x, y))$ 。则 $\tau(u_1, u_2)$ 为相对斜率, $\varphi(u_1, u_2)$ 为相对旋转角, 可以进一步推导出这两幅图像之间的变换矩阵为 $BA^{-1} = H_\lambda R_1(\psi) T_t R_2(\varphi)$ 。图 4(a) 中, 经度角 $\varphi = \varphi'$, 纬度角 $\theta = 30^\circ$, $\theta' = 60^\circ$ 绝对斜率分别为 $t = \frac{1}{\cos\theta} = \frac{2}{\sqrt{3}}$, $t' = \frac{1}{\cos\theta'} = 2$, 则相对斜率为 $\tau = \frac{t'}{t} = \sqrt{3}$; 在图 4(b) 中, $\varphi = \varphi + 90^\circ$, $\theta = 60^\circ$, $\theta' = 75.3^\circ$, $t = 2$, $t' = 4$, $\tau(u_1, u_2) = t \cdot t' = 8$ 。由此可见, 两幅图像间很小的绝对斜率变化会导致很大的倾斜角变化, 在某些情况下可达到 36° 、 64° 甚至更大。两幅图像能相互匹配的最大相对斜率 $\tau_{\max}$ 取决于 t 和 t' 的值。

在人脸识别等需进行图像匹配算法研究的场景中, 对算法考察点之一就是算法抗视角变化的鲁棒性, 也就是考察算法对两幅图像成功匹配所能容忍的最大相对斜率 $\tau_{\max}$ 。实验证明, SURF 的最大相对斜率 $\tau_{\max} \approx 2$ 。而 Harris-Affine 和 Hessian-Affine 最高可达到约 2.5, MSER 可达到 5~10。而后几种算法并未考虑图像尺度的变化, 当图像发生较大尺度变化时这些算法将失效。相比之下, SURF 算法具有很好的尺度不变性。

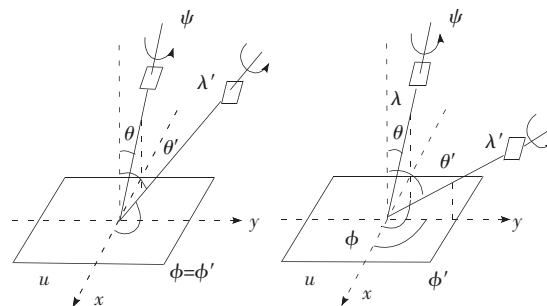


图 4 不同角度下的仿射变换图

Fig. 4 Affine transformation images with different view-points

3.3 算法实现步骤

对相机拍摄视角变换所形成的经度角和纬度角进行模拟过程如图 5 所示。再采用 SURF 算法进行匹配, 这样既保留了 SURF 算法的优越性, 又克服了视角变换。算法的主要实现步骤如下:

(1) 模拟基准图像在所有可能的相机拍摄视角变换下产生的形变, 组成模拟图像序列。对形变的主要影响因素为经度角 φ 和纬度角 θ 的变化。对于数字图像来说, 这一过程表现为对不同

倾斜程度的图像做采样。对采样后的图像用标准差为 $c\sqrt{t^2-1}$ (其中 $c=0.8$) 的高斯滤波函数进行处理。

(2) 对相机旋转和倾斜的模拟。可以依据实际情况, 采用指定数量的经度值和纬度值来表示可能存在的角度。

(3) 采用适当的抗尺度、旋转和平移变化的算法对所有模拟出来的图像进行匹配。本文采用 SURF 来进行匹配。

(4) 模拟纬度角 θ 所对应的倾斜度 t 的采样值可以是 $t=1, a, a^2, \dots, a^n$, 其中 $a>1$ 。本文取 $a=\sqrt{2}$ 。

(5) 与 t 采样值相对应的经度角 φ 的值为序列 $0, b/t, \dots, kb/t$, 本文取 $b=72^\circ$ 。 k 是满足约束条件 $kb/t < 180^\circ$ 的最小正整数。

(6) 计算复杂度: 在对相机拍摄的经度角和纬度角进行模拟的过程, 主要是对 t 进行采样并针对每个采样图进行匹配。所以此算法的复杂度正比于 t 的采样数量。同时, SURF 计算时间正比于匹配图像的尺寸。

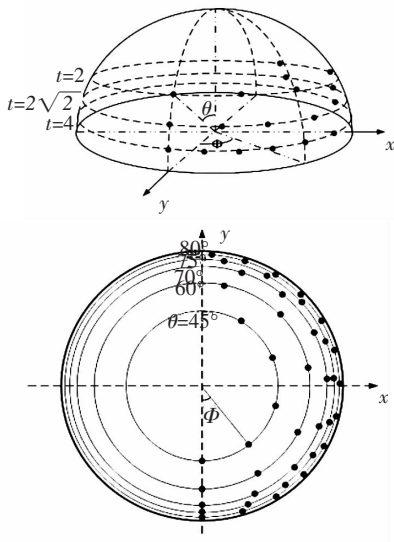


图 5 算法模型示意图

Fig. 5 Model diagram of proposed algorithm

4 仿真结果及实验分析

实验仿真平台的硬件环境为: Intel (R) Core (TM) i3-2120 CPU, 主频 3.29 GHz, 内存 2 GB 的 PC 机; 软件开发工具为: Windows XP 操作系统、VC++6.0、Matlab R2010b。本文分别采用

Mikolajczyk^[14-16] 库中的资料图片和实拍图片进行实验。

实验分别检验算法对绝对斜率和相对斜率的鲁棒性, 实验过程如图 6 所示。

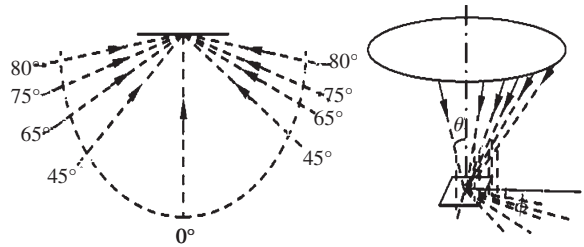


图 6 实验过程示意图。(a) 绝对斜率变化过程; (b) 相对斜率变化过程。

Fig. 6 Schematic diagram of experimental procedure. (a) Changing process of the absolute slope; (b) Changing process of the relative slope.

其中, 对于绝对斜率的检验原理如图 6(a) 所示, 取经度角 $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ$, 待配准图像纬度角 $\theta_1 = 0^\circ$, 基准图像纬度角从 50° 变换到 80° , 实验结果如图 7 所示, 实验数据见表 1。图 7 中左侧对应点用白线连接的是本文算法的匹配结果, 右侧用红

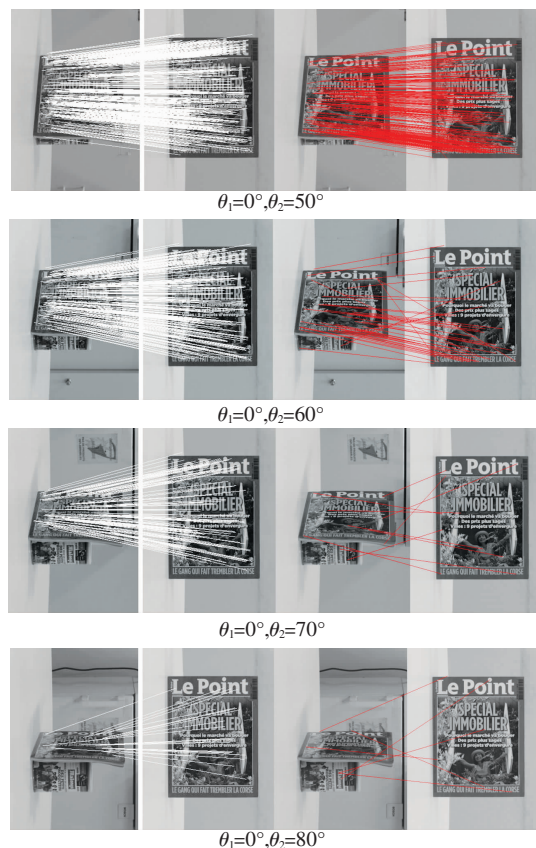


图 7 绝对斜率变化的实验结果

Fig. 7 Result of changing process of the absolute slope

表 1 绝对斜率变化时匹配对数比较
Table 1 Result comparison of changing process of absolute slope

θ_2/t	SURF	本文算法
50°/1.6	245	408
60°/2.0	14	265
70°/2.9	2	190
80°/5.8	0	97

线连接对应点的是 SURF 匹配结果。

从图 7 及表 1 中可以看出,当纬度角 $\theta=50^\circ$ 时,本文算法和 SURF 算法都能很好地完成匹配,但当 θ 继续增大时,本文算法的优越性显现出来,绝对倾斜角度大于 70° 时,SURF 算法基本失效,而本文算法仍然稳定,甚至绝对倾斜角度达 80° 时本文算法仍能很好地完成匹配。

对于相对斜率的检验原理如图 6(b)所示,取绝对斜率 $t_1=t_2=4$,待配准图像经度角 $\varphi_1=0^\circ$,基准图像经度角 φ_2 取 50° 变换到 80° ,实验结果如图 8 所示,实验数据见表 2。其中白色连线为本文算法匹配结果,红色连线为 SURF 算法匹配结果。

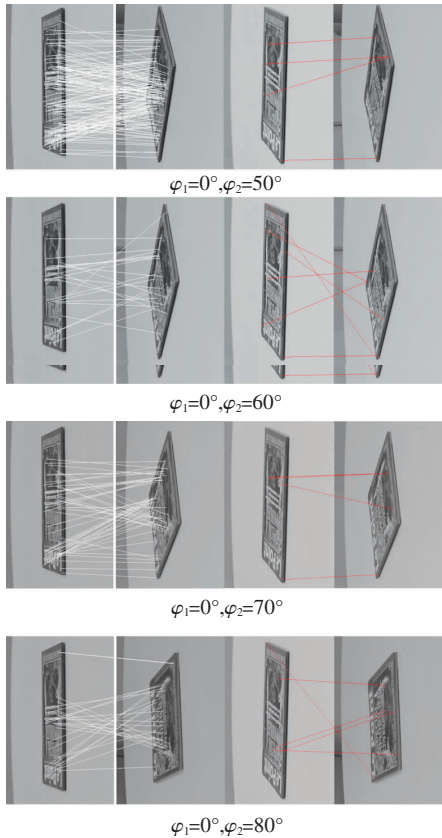


图 8 相对斜率变化的实验结果
Fig. 8 Result of changing process of the relative slope

表 2 相对斜率变化时匹配对数比较
Table 2 Result comparison of changing process of the relative slope

φ_2/τ	SURF	本文算法
50°/10.2	5	88
60°/12.4	3	192
70°/14.3	2	32
80°/15.6	0	95

从图 8 及表 2 中可以看出:当纬度差异大于 50° 导致原 SURF 算法基本失效的情况下,所提算法能够得到更多准确的匹配对数。因此,针对基于特征的物体识别、图像检索的应用中,视角变化大的图像无法匹配的情况,本文给出了较好的解决方案。

为进一步验证本文算法的有效性,采用在实验室实际拍摄的两组图片进行实验,分别模拟不同的场景。首先采用有较大纬度、较小经度并且伴随一定光照变化的图片进行实验。实验结果如图 9 所示,其中 (a) 为 SIFT 的匹配结果;(b) 为 SURF 的匹配结果;(c) 为本文算法的匹配结果。实验数据如表 3 所示。

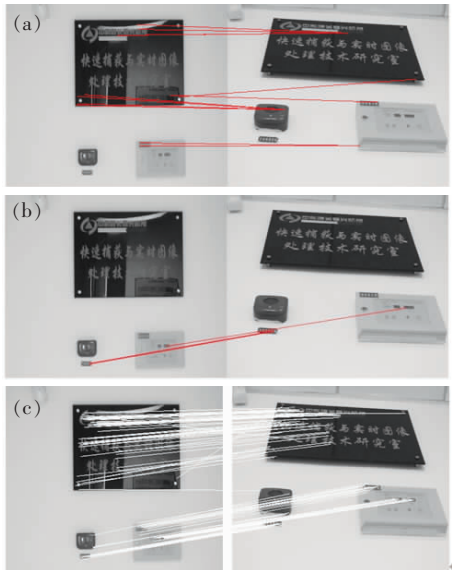


图 9 存在光照和视角差异的匹配结果对比。(a) SIFT 算法的匹配结果;(b) SURF 算法的匹配结果;(c) 本文算法的匹配结果。

Fig. 9 Comparison of matching results with illumination and viewpoint changing. (a) Matching result of the SIFT algorithm; (b) Matching result of the SURF algorithm; (c) Matching result of the proposed algorithm.

表 3 存在光照和视角差异的匹配结果

Table 3 Matching results with illumination and viewpoint changing

算法	总对数	准确对数	算法耗时/s
SIFT	11	0	3.78
SURF	6	4	1.54
本文算法	230	227	5.43

从图 9 及表 3 中可以看出与原 SIFT、SURF 算法相比,本文算法对光照和视角差异表现出良好的适应性。但从表 3 的数据中可以看出,本文算法在增加正确匹配点对数的同时耗时明显增多。这有待于进一步优化。

图 10 为一组模拟基准图像和待配准图像间有较大纬度变化、较小经度和较大尺度变化时的匹配结果。其中(a)为 SIFT 的匹配结果;(b)为 SURF 的匹配结果;(c)为本文算法的匹配结果。实验数据见表 4。

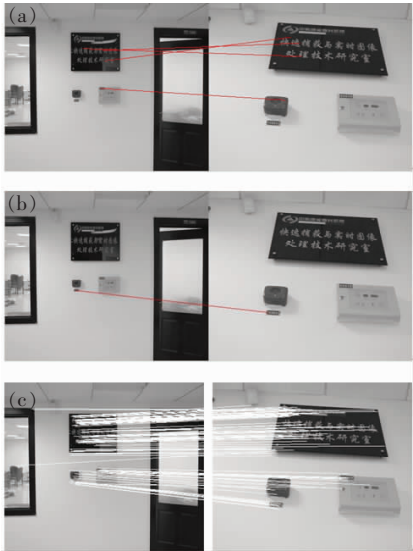


图 10 存在尺度和视角差异的匹配结果对比。(a) SIFT 算法的匹配结果;(b) SURF 算法的匹配结果;(c) 本文算法的匹配结果。

Fig. 10 Comparison of matching results with scale and viewpoint changing. (a) Matching result of the SIFT algorithm; (b) Matching result of the SURF algorithm; (c) Matching result of the proposed algorithm.

从图 10 及表 4 中可以看出对于存在较大尺度和视角差异的情形,原 SIFT、SURF 算法得到

准确匹配点对数较少导致匹配失败。而本文算法虽耗时相对两者增多,但明显增加了匹配点对数,从而提高了匹配算法的可信度。

表 4 存在尺度和视角差异的匹配结果

Table 4 Matching results with scale and viewpoint changing

算法	总对数	准确对数	算法耗时/s
SIFT	5	0	3.64
SURF	3	2	1.48
本文算法	196	182	5.37

从实验过程中可以看出,本文算法在明显增加匹配点对的同时较原 SIFT、SURF 算法耗时增多。这是由于:对于基准图像生成模拟图像序列及生成抗视角变换的特征点集的过程增加了运算量,是算法中最耗时的环节,有待进一步优化。但在工程实际中,基准图像可以预先获取,因此生成基准图像的模拟图像序列及 SURF 特征点提取均无需实时处理,可将结果预存起来,对实时性并不造成影响。需要实时处理的仅有对待配准图像的 SURF 特征提取和匹配。由于 SURF 的运算速度较 SIFT 算法提高了近 3 倍且目前 SIFT 已经几乎满足实时性要求,若再将待配准图像的尺寸做一定限制,在降低部分算法性能时,对图像的实时处理是可能的。

5 结 论

针对原始 SURF 算法对于视角变换较大的图像不能进行有效匹配的缺陷,提出了一种改进的 SURF 算法:首先模拟相机可能的拍摄视角对基准图像生成一组图像序列,对序列中的每一幅图像分别作 SURF 算法特征点提取;然后映射到原始图像,此时原始图像中的特征点数目明显增多;之后利用欧氏距离作为衡量特征点相似性的准则;最后遍历所有的特征点,得到最终的匹配对。实验证明所提算法在保证 SURF 算法原有的尺度、光照、旋转不变的基础上还能有效地抵抗视角变换。

本文算法的不足在于,每幅模拟图都进行特征提取,导致映射到原始图像的特征点存在冗余。后续将针对怎样有效地消除冗余以及如何提高算法的运算速度开展工作。

参 考 文 献:

- [1] 李婕,邓德祥,石文轩,等. 一种抗视角变换的 SURF 匹配算法 [J]. 计算机应用研究,2012,29(9):3536-3539.
- [2] Schmid C, Mohr R, Bauckhage C. Evaluation of interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, 37(2):151-172.
- [3] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1):63-86.
- [4] Matas J, Chum O, Urban M, *et al.* Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions [J]. *Image Vision Computing*, 2004, 22(10):761-767.
- [5] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- [6] Herbert B, Tinne T, Luc V G. SURF: speeded up robust features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3):346-359.
- [7] 李英,李静宇,徐正平. 结合 SURF 与聚类分析方法实现运动目标的快速跟踪 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(4): 544-550.
- [8] 丘文涛,赵建,刘杰. 结合区域分割的 SIFT 图像匹配方法 [J]. 液晶与显示, 2012, 27(6):827-831.
- [9] 程明明,王贺,安平,等. 基于特征点匹配的多视图像校正 [J]. 液晶与显示, 2010, 25(4):593-597.
- [10] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6):381-395.
- [11] 贺柏根,朱明. 改进的抗全仿射尺度不变特征变换图像匹配算法 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(10):2472-2477.
- [12] MOREL J M, YU G. ASIFT: A new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM Journal on Imaging Science*, 2009, 2(2):438-468.
- [13] 陈冰,赵亦工,李欣. 基于快速鲁棒性特征的景象匹配 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11):2714-2718.
- [14] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10):1615-1630.
- [15] Mikolajczyk K, Tuytelaars T, Schmid C, *et al.* A comparison of affine region detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 65(1):43-72.
- [16] 王永明,王贵锦. 图像局部不变性特征与描述 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010:150-163.